

# **Validierung von 3-D Strömungsberechnungen im Modellversuch und Anwendung in der Studentenausbildung**

Detlef Aigner, Reinhard Pohl

Mit der rasanten Entwicklung der Computertechnik wachsen die Möglichkeiten der mathematisch-numerischen Modellierung in der Hydromechanik (Computational Fluid Dynamics, CFD). Immer mehr Anwenderprogramme werden zum täglich genutzten Werkzeug des Ingenieurs zur Lösung vielfältiger Problemstellungen. Viele Aufgaben sind ohne die Computertechnik nicht mehr lösbar. Simulationen mit ein-, zwei- und allmählich zunehmend dreidimensionalen Programmen ermöglichen heute schon eine Komplexität der Betrachtung, die es ohne diese Programme nicht gäbe. In Verbindung mit den verbesserten Möglichkeiten der Visualisierung hat die Software zur Strömungssimulation inzwischen in den Planungsbüros Einzug gehalten und wird auch von den Auftraggebern akzeptiert, auch wenn die Ergebnisse numerischer Modelle immer noch mit Skepsis betrachtet werden. Mit dieser Entwicklung steigen die Anforderungen an unsere Absolventen – nicht nur im fachgerechten Umgang mit dieser Technik sondern vor allem auch in der Interpretation der Ergebnisse. Die breite Einbindung dieser Simulationstechnik in die Ausbildung und Forschung an der Technischen Universität Dresden wird zu einem Schwerpunkt der Lehre der kommenden Jahre werden.

## **1 Einleitung**

Das Institut für Wasserbau und Technische Hydromechanik der TU Dresden führt im Rahmen der Ausbildung der Studenten der Wasserwirtschaft, der Hydrologie und des Bauingenieurwesens unterschiedliche Praktika und Belege in Verbindung mit physikalischen Modellversuchen durch. Im Rahmen der Realisierung bzw. Vorbereitung von Lehrveranstaltungen wie z.B. Turbulenzmodelle, Hydroinformatik oder Softwareanwendung wurde die schon länger diskutierte Frage aufgegriffen, ob Simulationsprogramme diese physikalischen Modelle ergänzen oder gar ersetzen können. Mit Unterstützung von Studenten, die im letzten Sommer im Hubert-Engels-Labor ein Praktikum absolvierten, wurden numerische Modelle u.a. von bisher üblichen physikalischen Modellversuchen erstellt und am Computer simuliert. Die Ergebnisse am physikalischen und numerischen Modell wurden verglichen. Es sollte nicht nur die Frage beantwortet werden, wie schnell der Umgang mit einem numerischen 3D-Modell erlernbar

ist, sondern auch, wie bedienerfreundlich oder wie genau sie sind und ob diese Strömungsmodelle den physikalischen Modellversuch ersetzen können.

## 2 Auswahl der Software

Für die vergleichenden Berechnungen wurde eine Software gesucht, die eine dreidimensionale Strömungssimulation mit freier Oberfläche bzw. als Wasser-Luft-Gemischströmung ermöglicht. Im Hubert-Engels-Labor werden nicht nur physikalische Modelle mit geschlossenen Systemen oder ebenen Oberflächen untersucht, wie z.B. Rohrleitungen oder Behälter mit konstantem horizontalem Wasserspiegel, sondern oft variieren die Wasserstände z.B. bei Überfallmodellen oder durch instationäre Vorgänge. Aber auch physikalische Modelle mit Wasser-Luft-Gemischen z.B. der belüftete Heber oder Schachtüberfälle sind oft Gegenstand der Untersuchungen.

Um diese hydraulischen Prozesse am Computer nachzubilden, bedarf es eines numerischen Modells, das die Phasen Wasser und Luft, die so genannte Zweiphasenströmungen, abbilden kann.

Auf diesem Gebiet der Softwareentwicklung hat sich in den letzten Jahren viel getan. Es gibt verschiedene Modelle, die sich für den Wasserbauingenieur eignen. Leider erfordert die Einarbeitung in die komplexe Software immer noch sehr viel Zeit, so dass eine umfassende und korrekte Anwendung eine ständige Beschäftigung mit diesen Programmen erforderlich macht. Das ist für die Ausbildung kaum machbar. Hier eignen sich vorbereitete Modelle, Bausteine, oder einfache Beispiele. Wir versuchten diesen Schritt zu gehen und wollen das an einigen Beispielen zeigen.

Für eine dreidimensionale Strömungssimulation stehen heute einige Programme zur Verfügung, von denen hier nur eine Auswahl genannt werden soll. Die Programme MIKE 3 von DHI Water & Environment, Dänemark, Flow 3D von FlowScience, USA, Santa Fe, Fluent von Fluent Deutschland GmbH Darmstadt und CFX von ANSYS, Inc., USA-Canonsburg.

Das Programm **MIKE 3** eignet sich vor allem für hydrodynamische Simulationen im Küstenbereich oder in Ästuaren, für Sedimenttransport oder Schadstoffausbreitungen mit Wasserkörpern, bei denen ein 3D-Effekt eine Rolle spielt. Das Modell **Flow 3D** scheint sehr gut für derartige Simulationen von 3D-Strömungen an Wehren, Überfällen und Tosbecken geeignet zu sein. Es vereint den Modellaufbau, die Vorbereitung, Berechnung und Ergebnisdarstellung in einem. Charakteristische Überfallströmungen, Tosbecken oder Vermischungsprozesse sollen ebenso berechenbar sein, wie Reaktionen, Dichteströmungen und Mehrphasenströmungen. Aus zeitlichen und finanziellen Gründen war es nicht möglich, dieses Programm bis Redaktionsschluss zu testen.

Das Programm **Fluent** ist zwar auf strömungsmechanische Problemlösungen aus dem Maschinen- und Flugzeugbau spezialisiert, würden sich aber laut Beschreibung auch für Strömungen mit freien Oberfläche eignen.

Die Autoren haben sich für das Programm **ANSYS CFX** entschieden, weil erste Erfahrungen schon mit den damals noch getrennten Software-Anbietern ANSYS-Flowtran und CFX-TASCflow bestanden und vorhandene Modelle einfach importierbar waren. Simulationen mit freier Oberfläche und Vermischungsprozesse werden mit CFX5.7.1 und der neuesten Version CFX10 ebenfalls angeboten. In das Programm CFX-10 können extern erzeugte Geometrien des Strömungsgebietes (Gitternetze) importiert werden, für deren Erstellung zusätzliche Programme erforderlich sind.

### 3 Modellversuche im Hubert-Engels-Labor

Die Modellversuche wurden im Hubert-Engels-Labor der Technischen Universität Dresden durchgeführt. Das Labor hat eine lange Tradition in der Durchführung von physikalischen Modellversuchen, insbesondere für den Fluss- und Wasserbau, für Hochwasserentlastungs- und Energieumwandlungsanlagen, für die Strömungsteilung oder die Mehrphasen-Gemischströmung. Seit 1898, der Gründung des Labors durch Prof. Hubert Engels, wurden physikalische Modellierungen durchgeführt. Als Beispiele für die vorliegenden Vergleiche wurden hier die Modelle Quelltopf, Standardüberfall und Schachtüberfall ausgewählt.

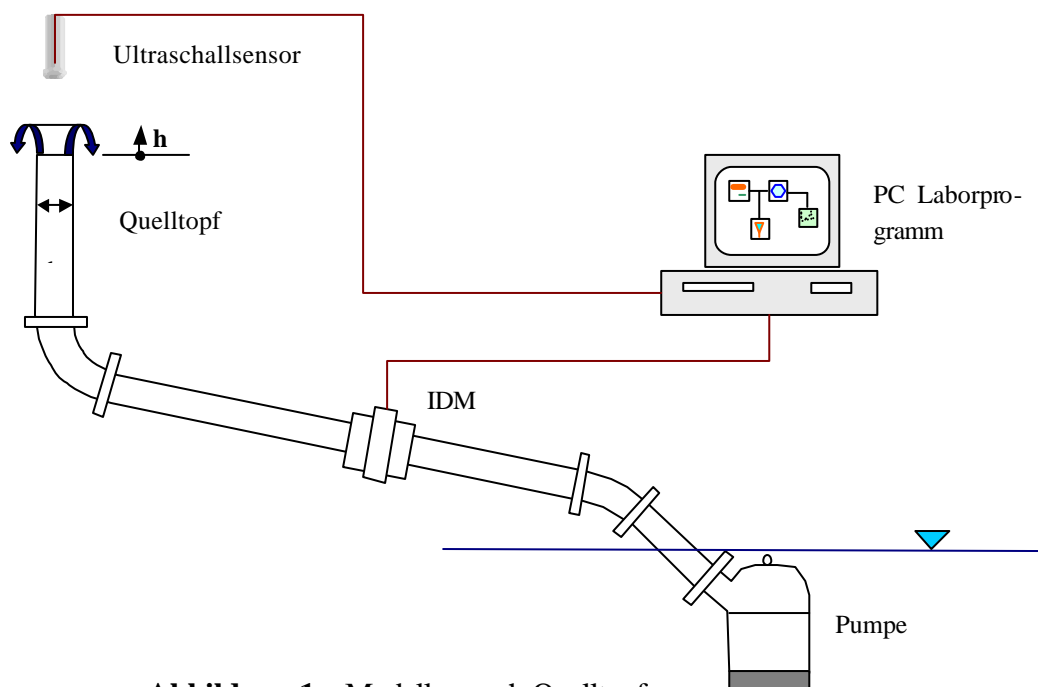
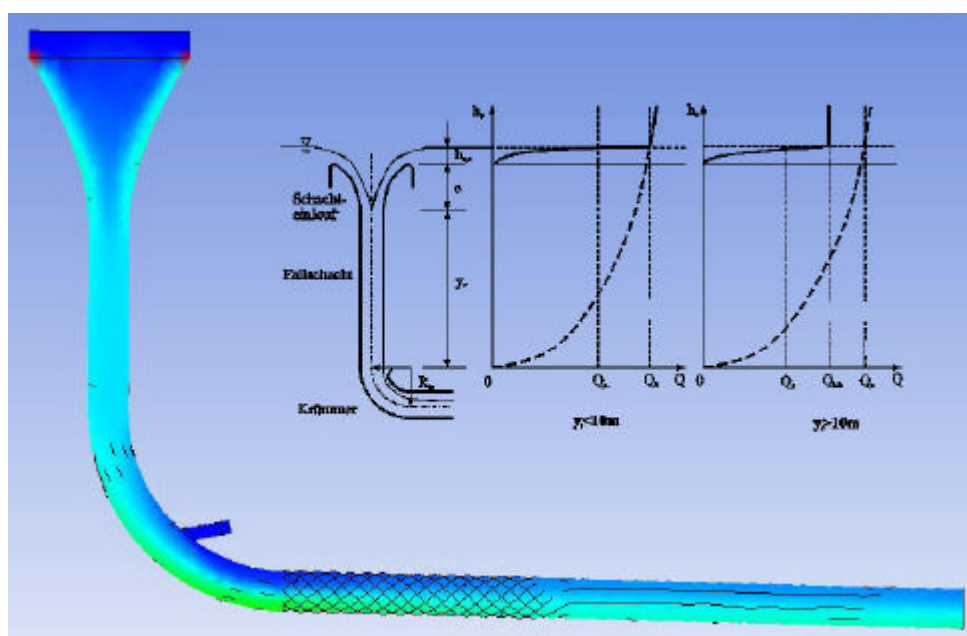


Abbildung 1 Modellversuch Quelltopf

Der **Quelltopf** (ein hydraulisches Bauteil zur Wasserverteilung in Becken und Gefäßen – ein umgekehrter Schachtüberfall) wurde zu Vergleichsmessungen im Labor aufgebaut, um ältere Versuchergebnisse (Röhner 1981) zu überprüfen. Es wurden Innendurchmesser von 94, 152, 192 und 236 mm untersucht.

Der **Standardüberfall** wird von den Studenten der Wasserwirtschaft, der Hydrologie und des Wasserbaus im Rahmen eines Beleges im Labor untersucht. Außerdem wurden in jüngster Zeit Untersuchungen zur Einschnürung des Überfallstrahles durch Pfeiler auf dem Überfallrücken durchgeführt.

**Schachtüberfälle** werden in unserem Labor seit längerem untersucht. Dazu gehören Modelle von Talsperren (Lichtenberg, Ohra, Aabach, Zeulenroda) und Hochwasserrückhaltebecken (Glashütte). Am Computer nachgebildet wurde für die vorliegende die Hochwasserentlastung der Aabach-Talsperre.



**Abbildung 2** Numerisches Modell eines Schachtüberfalls (Aabach-Talsperre)

## 4 Numerische Modelle

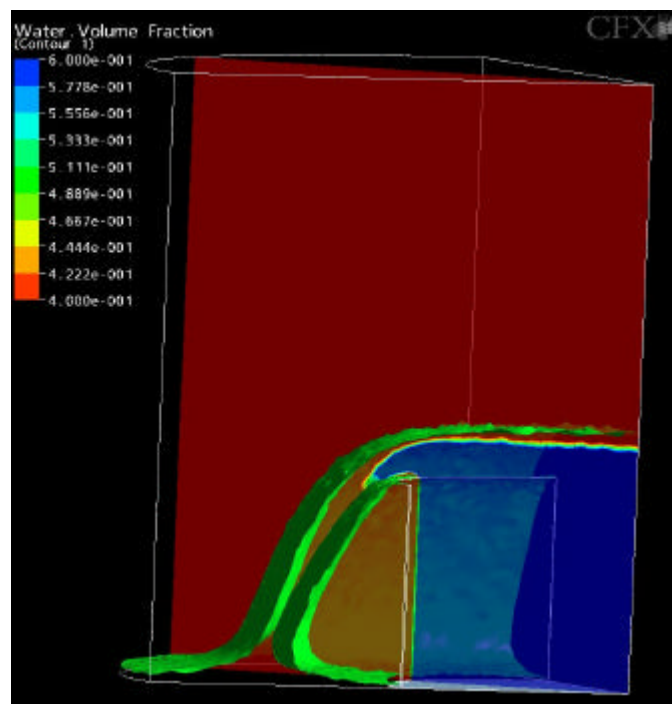
Die Geometrien mussten mit einer Netzgenerierungssoftware erzeugt und in das Programm CFX importiert werden. Dabei wurden Erfahrungen mit den verschiedenen Herangehensweisen gesammelt, der systematische Aufbau aus Punkten, Linien, Flächen und Netzen wie im ANSYS üblich bis zur extrudierten Skizze bzw. CAD-Konstruktion. Die richtige Planung des Modells spielt dabei eine wichtige Rolle. Wichtigste Erkenntnis: Die Modellplanung und -erstellung benötigt die meiste Zeit bei der numerischen Simulation, also ähnlich dem physikalischen Modellaufbau. Das numerische Modell erfordert ein präzises Arbei-

ten und stellt einen iterativen Prozess dar. Wichtigstes Ziel ist dabei die Optimierung, Verfeinerung und Verbesserung des Modells. Der Modellumfang hat einen wesentlichen Einfluss auf die Rechenzeit und die Handhabbarkeit der Daten. Das kann sehr gut am Modell Quelltopf erläutert werden.

### Der Quelltopf

Anfänglich wurde der gesamte Quelltopf modelliert, obwohl es sich um ein rotationssymmetrisches System handelt. Dann erfolgte die Modellierung eines Ausschnittes des Quelltopfes mit der Definition der Seitenwände als Symmetrieebenen. Wichtig war dabei, dass der Zentriwinkel nicht zu spitz wurde, was zu Fehlern bei der Vernetzung führte (Qualität der 3D-Elemente).

Der Zufluss wurde über die Normalen-Geschwindigkeit an der Bodenfläche als Einlauf definiert. Als Simulationsergebnis wurde die Grenze zwischen den Volumenfraktionen Luft und Wasser (50% -Linie) als Überfallhöhe über den Quelltopf ermittelt.



**Abbildung 3** Simulationsergebnis am Tortenstück des Quelltopfes

Die theoretischen Gleichungen des Quelltopfes mit dem Durchmesser  $d$  sind die Überfallformel und die so genannte Springbrunnenformel mit folgenden Annahmen:

Kontinuität: 
$$v = \frac{4 \cdot Q}{p \cdot d^2} \quad (1)$$

Boussinesqzahl: 
$$\text{Bou} = \frac{v}{\sqrt{g \cdot r_{\text{hy}}}} = \frac{v}{\sqrt{g \cdot d/4}} = \frac{8 \cdot Q}{p \cdot \sqrt{g} \cdot d^{2,5}} \quad (2)$$

Springbrunnenformel:

$$h = \frac{v^2}{2g} = \frac{8 \cdot Q^2}{g \cdot p^2 \cdot d^4} \quad \rightarrow \quad \frac{h}{d} = \frac{8 \cdot Q^2}{g \cdot p^2 \cdot d^5} = \frac{1}{8} \cdot \text{Bou}^2 \quad (3)$$

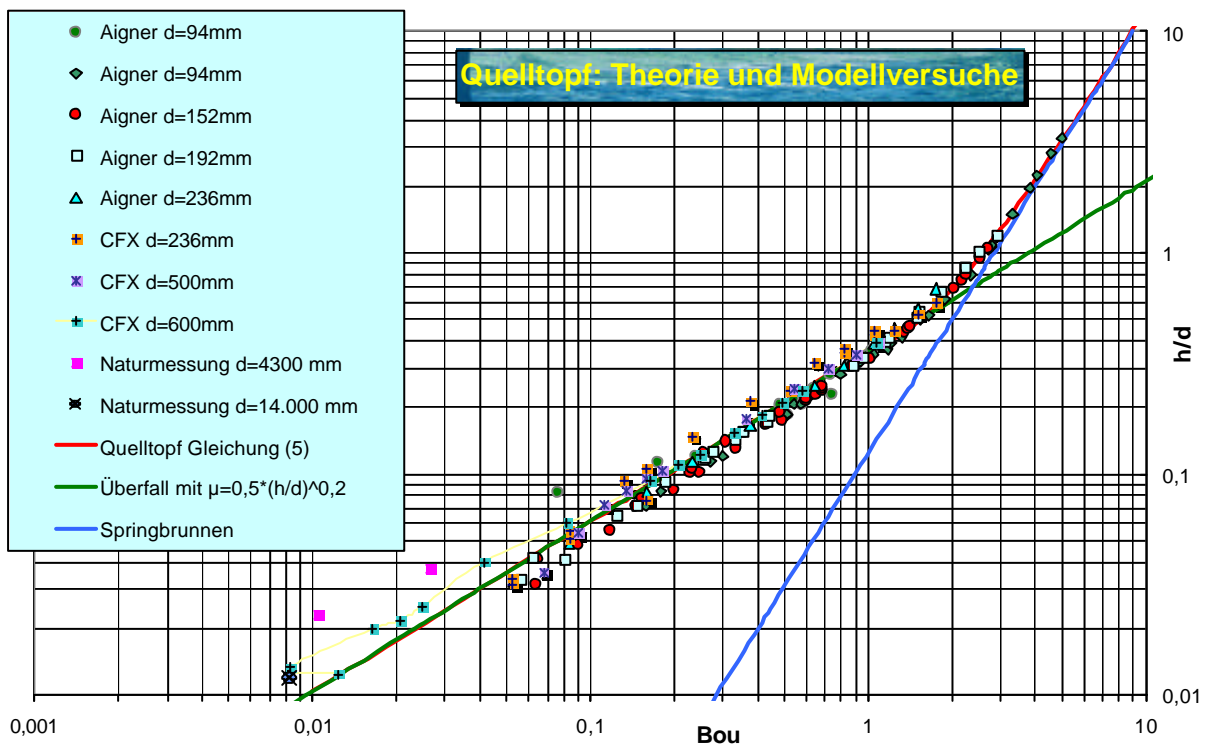
Überfallformel:

$$Q = \frac{2}{3} \cdot m \cdot \sqrt{2g} \cdot p \cdot d \cdot h^{1,5} \quad \rightarrow \quad \text{Bou} = \frac{2^{4,5}}{3} \cdot m \cdot \left( \frac{h}{d} \right)^{1,5} \quad (4)$$

Im Bereich des Überfalls ergab sich eine Abhängigkeit des Überfallbeiwertes von der Überfallhöhe. Daraus entstand die folgende Gleichung:

Quelltopfgleichung: 
$$\frac{h}{d} = \frac{\text{Bou}^2}{8} \cdot (1 - X^2) + 0,34 \cdot \text{Bou}^{0,77} \cdot X \quad (5)$$

mit  $X = 1$  für  $\text{Bou} = 1$  und  $X = 1/\text{Bou}$  für  $\text{Bou} > 1$



**Abbildung 4** Vergleich der Ergebnisse aus numerischen und physikalischen Untersuchungen

Der Vergleich der Ergebnisse aus beiden Modellen zeigte eine erstaunlich gute Übereinstimmung. Berücksichtigt man die Genauigkeitseinschränkungen bei der Ermittlung der Überfallhöhe am numerischen Modell (mehrer Millimeter) dann ergibt sich ein gutes Ergebnis. Dagegen wichen die Vergleichswerte aus der Praxis ( $d = 4,3$  m und  $d = 14$  m), die nicht selbst gemessen wurden, erheblich von den Modellwerten ab.

### Standardüberfall

Das im Labor untersuchte Überfallwehr hat eine Bemessungsenergiehöhe  $h_{EB}$  von 84 mm, eine Wehrhöhe von  $w = 292$  mm und eine Überfallbreite von  $b = 300$  mm. Die geplanten Vergleichsmessungen mit einem Pfeiler auf dem Wehrrücken wurden nicht rechtzeitig zum Redaktionsschluss beendet, so dass hier nur der einfache Überfall mit der Computersimulation verglichen wird. Die Überfallform ergibt sich nach der Unterkante eines freien Überfallstrahles z.B. nach Oficèrov. Das Besondere am Standardwehr ist der Anstieg des Überfallbeiwertes bei gleichzeitigem Absinken des Druckes auf dem Überfallrücken. Beide Werte wurden zwischen Theorie und Modell verglichen und es zeigte sich wiederum eine recht gute Übereinstimmung.

$$\text{Überfallformel} \quad C = \frac{Q}{b \cdot h^{1,5}} \quad p = p_{\text{Min}} \approx r \cdot g \cdot h \cdot \left(1 - \frac{h}{h_{EB}}\right) \quad (6)$$

**Tabelle 1** Standardüberfall, Vergleich Numerisches Modell und Theorie

Numerisches Modell					Theorie	
Q [m <sup>3</sup> /s]	h [m]	C	h/h <sub>EB</sub>	p [Pa]	C	p [Pa]
0,00876	0,058	2,09	0,69	-32	2,08	176
0,01752	0,086	2,31	1,024	-172	2,23	-20
0,02628	0,111	2,37	1,32	-529	2,34	-350
0,03504	0,132	2,43	1,57	-894	2,42	-740
0,04380	0,152	2,46	1,81	-1370	2,5	-1207
0,05256	0,167	2,57	1,99	-1900	2,54	-1619



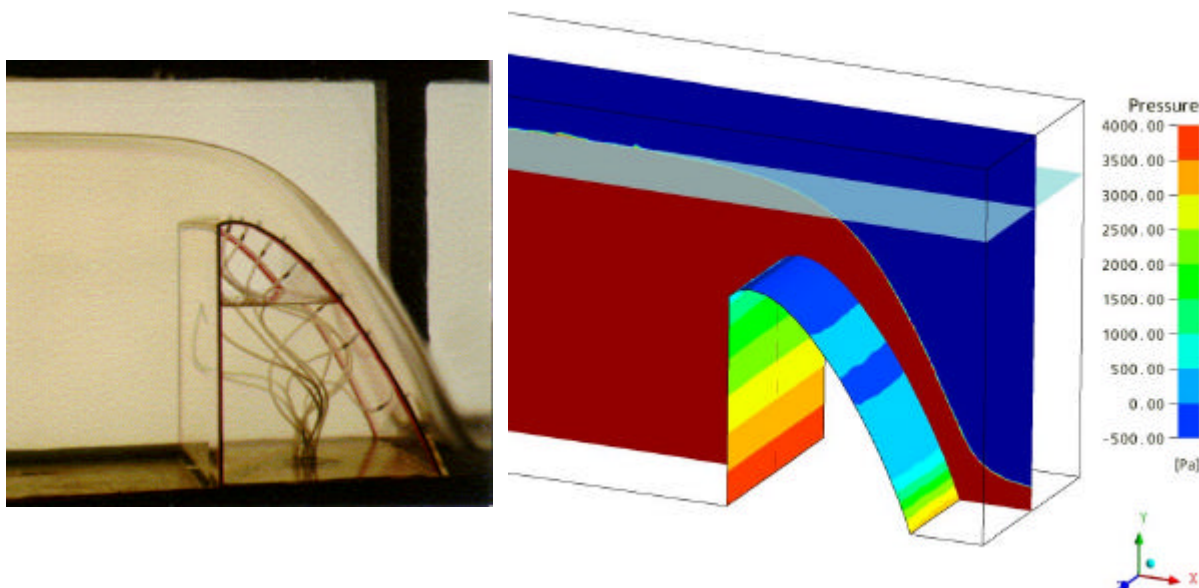


Abbildung 5 Standardüberfall, physikalisches Modell

Abbildung 6 Standardüberfall, numerisches Modell

## Schachtüberfall

Das aufwändigste der vorgestellten Modelle war die Nachbildung eines Schachtüberfalles mit Einlauftrichter, Fallrohr, Krümmer mit Erweiterung und Öffnung für Lufteintritt, Ablaufstollen und Tosbecken. Wegen der in Fließrichtung wechselnden geometrischen Formen und der komplizierten Übergänge ergaben sich teilweise Probleme bei der Netzgenerierung (zu spitze Winkel), der speziellen Einlaufbedingungen und der komplizierten Tosbeckenformen mussten hier einige Vereinfachungen vorgenommen werden, die aber hydraulisch nur einen untergeordneten Einfluss hatten.

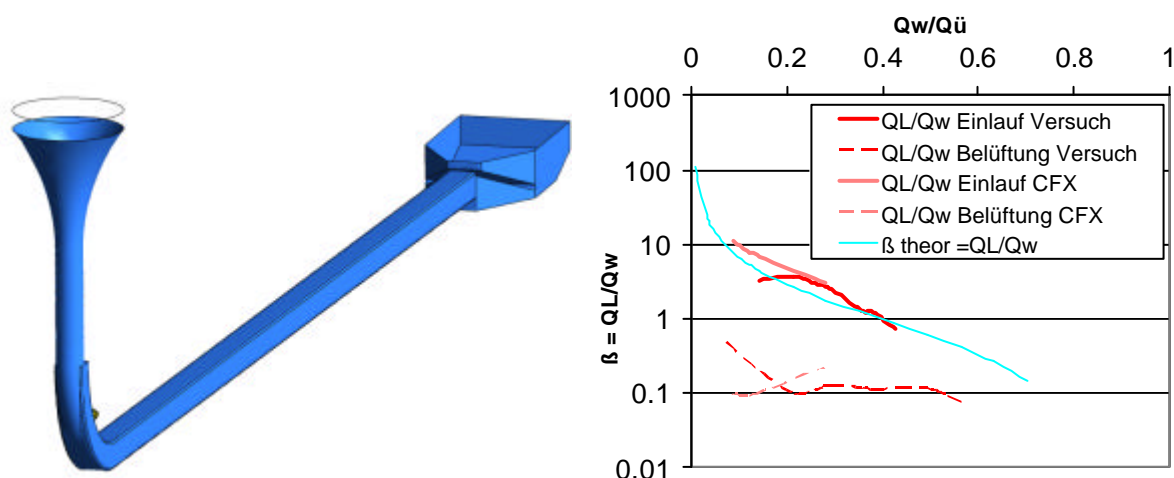
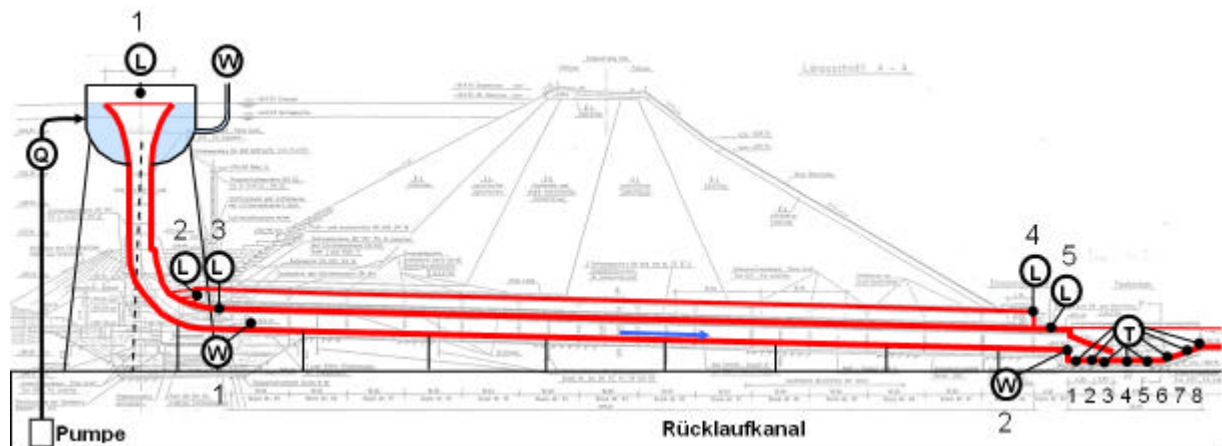


Abbildung 7 Numerisches Modell der Hochwasserentlastung

Abbildung 8 Vergleich des berechneten und gemessenen Luftdurchsatzes





**Abbildung 9** Physikalisches Modell der Hochwasserentlastung und Dammquerschnitt der Aabachtalsperre

Verglichen wurde hier der normierte Luftdurchsatz in Abhängigkeit zum normierten Abfluss. Es wird deutlich, dass gemessene und berechnete Werte relativ gut übereinstimmen und auch die theoretische Kurve für den kompressionsfreien Luftdurchsatz in der gleichen Größenordnung liegt. Die Tendenz, dass im verkleinerten Modellversuch die transportierten Luftvolumina unterschätzt werden, deckt sich mit früheren Erfahrungen und ist auf Maßstabeffekte zurückzuführen.

## 5 Schlussfolgerungen

Der Vergleich zwischen herkömmlichen Berechnungen (z.B. Überfallformel, Rohrdurchfluss, empirische Luftbeimengung) numerischen und physikalischen Modellen hat gezeigt, dass Ergebnisse vergleichbar sind und teilweise sehr gut übereinstimmen. Auch wenn bei vielen numerischen Simulationen die Ergebnisse des physikalischen Modells zur Validierung verwendet werden, zeigen die vorgestellten einfachen Beispiele, dass die hydraulischen Grundgleichungen gut in den Modellen berücksichtigt werden. Die feinen Unterschiede, die sich z.B. durch die Verwendung unterschiedlicher Turbulenzansätze oder durch andere Vernetzungen ergeben, wurden hier nicht betrachtet. Es zeigte sich, dass die Erstellung eines detaillierten numerischen Modells sehr zeitintensiv ist. Die Genauigkeit der Ergebnisse eines numerischen Modells (z. B. die Wasseroberfläche) wird von der Auflösung des Netzes bestimmt. Netzelemente von einem Zentimeter lassen keine Ablesegenauigkeit von einem Millimeter zu. Erfreulich war die Genauigkeit der Übereinstimmung bei Strömungen mit freier Oberfläche aber auch von Wasser-Luft-Gemischströmungen. Hier kommt es im verkleinerten physikalischen Modell meist zu Maßstabeffekten. Ein Vorteil des numerischen Modells ist hier die Nachbildung im Maßstab 1:1.

Geplante weitere Untersuchungen werden die Validierung der auf verschiedene Weise erhaltenen Ergebnisse weiter unterstützen.

Insbesondere in der Studentenausbildung fördert die Ergebnisfindung mit verschiedenen Methoden die Vorstellungskraft und das Gefühl für hydraulische Phänomene und deren Modellierung.

## 6 Literatur

Bollrich, G.: Technische Hydromechanik 1.- Verlag Bauwesen, Berlin 5. Aufl. 2000

Bormann, K.: Der Abfluss in Schussrinnen unter Berücksichtigung der Luftaufnahme, Versuchsanstalt für Wasserbau der TU München Bericht Nr. 13, 1968

Röhner, M.: Untersuchungen am Quelltopf.- TU Dresden, 1981, unveröffentlicht

Hack, H.P.: Lufteinzug in Fallschächte mit ringförmiger Strömung durch turbulente Diffusion, Versuchsanstalt für Wasserbau der TU München, Bericht Nr. 36, 1977

Horsten, T: Hydraulische Berechnung eines Schachtüberfalls mit ANSYS CFX.- TU Dresden, Inst. f. Wasserbau und THM 2006, unveröffentlicht

Martin, H.; Pohl, R. (Hrsg.): Technische Hydromechanik /4.- Hydraulische und numerische Modelle.- Berlin, München: Verlag für Bauwesen 2000

Prien, K.-J., Pohl, R., Martin, H., Pollok, M.: Überprüfung der Leistungsfähigkeit eines Schachtüberfalls.- Dresdner Wasserbauliche Mitteilung 29/2005, TU Dresden, Institut für Wasserbau und Technische Hydromechanik, S. 55-65, ISSN 0949-5061, ISBN 3-86005-461-9Pohl, Reinhard: Aabach. 2004

Projektierung Wasserwirtschaft, WAPRO 4.09, Blatt 4 –Schachtüberfälle- , 1962

### Autoren:

apl. Prof. Dr.-Ing. habil. Detlef Aigner  
apl. Prof. Dr.-Ing. habil. Reinhard Pohl  
Institut für Wasserbau und THM der TU Dresden  
Helmholtzstrasse 10, 01062 Dresden

Tel.: ++49 – 351 – 46333837  
Fax: ++49 – 351 – 46337141  
IWD@mailbox.tu-dresden.de